

実海域における係留浮体構造物の動揺特性に関する実証観測

巻 幡 敏 秋* ・ 安 成 陽 彦** ・ 与 口 正 敏***
三宅成司郎**** ・ 金 子 慎 一*****

1. 緒 言

白島洋上備蓄基地は、北九州市の北方約8kmの地点に位置する白島（男島）の東側に隣接する東西約1,000m、南北約2,000mの海域にある。基地は、原油を貯蔵するための貯蔵船、貯蔵船を安全に係留するための港湾施設およびその他安全防災に係わる設備等から構成されている。貯蔵船は、港湾施設である泊地内に8隻（全容量約560万KL）ドルフィン係留される。

「港湾の施設の技術上の基準・同解説（1989）」には、「長期にわたる海上貯油基地の安全確保のために、貯蔵船の設置後、所要の期間にわたって風、波等による貯蔵船（実船）の動揺を直接観測し、その値が設計時に想定した値に対して適正であることを確認し、係留系全体の安全性を検討した上で、石油の貯蔵の供用を開始するものとする」と定められている。

本研究は貯蔵船の係留状態での風波等による動揺を実船で観測し、設計時に使用した数値シミュレーション手法の信頼性について検討・評価することを目的とする。

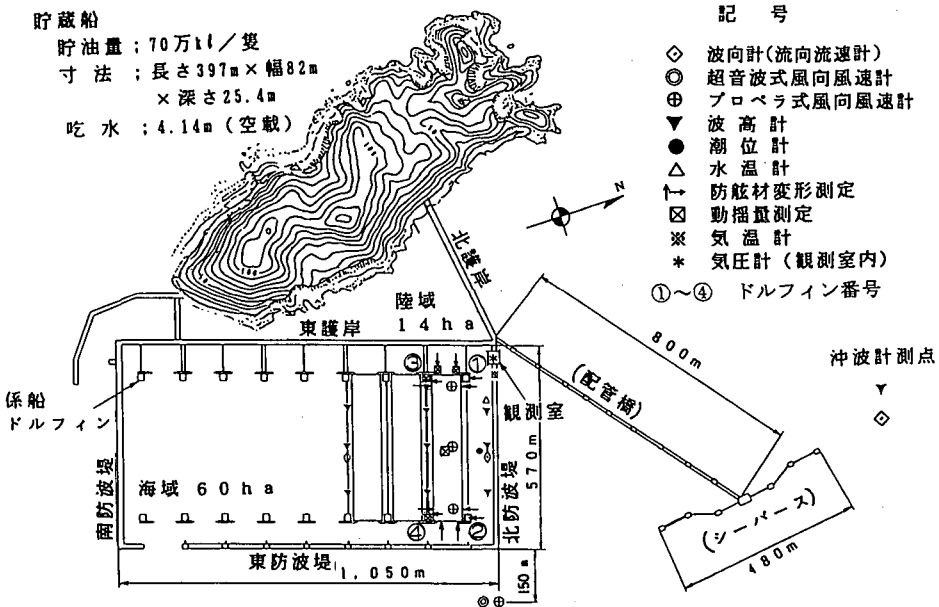
2. 実証観測の概要

2.1 観 測 概 要

実証観測は、貯蔵船泊地の最北端のバースに係留された貯蔵船白島一号を対象に、平成6年9月1日から平成7年8月31日にかけて実施された。観測データは図一1に示すように風（海上および貯蔵船上）、波（沖波および泊地内波）、貯蔵船動揺および副防舷材の変形・反力であり、データは自動観測システムにより収録された。

2.2 貯蔵船の係留状態

貯蔵船白島一号の主要諸元は、表一1に示すとおりである。また、実証期間中の約8ヶ月間は3隻が係留され、残りの4ヶ月間は4～6隻が係留される状態にあった。



図一1 白島石油備蓄基地と計測点の概要

* 正会員 工博 日立造船(株) 技術・開発本部
白島石油備蓄(株)
*** 正会員 日立造船(株) 技術・開発本部 技術研究所
**** 工修 日立造船(株) 技術・開発本部 技術研究所
***** 日立造船(株) 鉄鋼事業本部 橋梁設計部

表一 貯蔵船の主要目

載貨状態	空載状態 (実証期間中)	
$L \times B \times D \times d$	397 m $\times$ 82 m $\times$ 25.4 m $\times$ 4.1 m	
排水容積	133.471 m ³	
重心高さ (KG)	8.54 m	
横メタセンタ-高さ (GM)	130.06 m	
	慣動半径	固有周期
Roll 方向	29.44 m	(9.3 秒)
Pitch 方向	118.70 m	(11.6 秒)
Yaw 方向	121.48 m	—

2.3 実証観測用係留装置

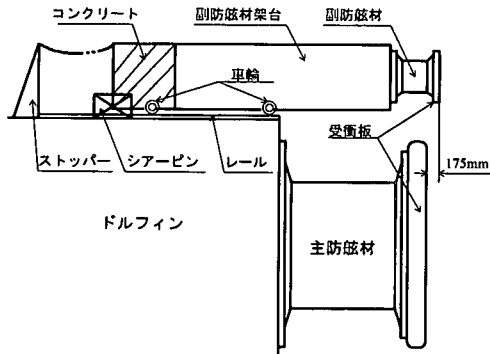
本基地の貯蔵船係留系は、非常に厳しい海・気象条件でも貯蔵船を安全に係留できる定反力型の防舷材（ゴムフェンダー寸法：C2500Hで、以下主防舷材）であり、実証観測中に想定される海・気象条件では貯蔵船の動揺はきわめて小さく防舷材の変形量も小さい。したがって、貯蔵船白島一号の動揺量および防舷材の変形量を正確に測定できるよう動揺拡大措置として図一2に示すような主防舷材より約175 mm突出する小型の防舷材（C500Hサイズで、以下副防舷材）を付設した。

副防舷材は、横係留点であるNo.1～4ドルフィンの北側と南側に1ドルフィン当たり2基設置した。これは、移動可能な架台上に固定され防舷材の変形が250 mm（50% 歪み）以上になれば副防舷材架台固定用のシアピンが切断され、架台が後退する構造が採用されている。

2.4 観測機器

海上風は海面上10 mに超音波式とプロベラ式、15 mと20 mにプロベラ式風速計を設置した観測檣からデータを取得した。また、貯蔵船上の風データは貯蔵船上に設置した3台のプロベラ式風速計（海面上約37 m）からデータを取得した。

沖波は泊地北方シーバース近傍に超音波式波高計と流向流速計を設置し、泊地内波は、貯蔵船白島一号の北側、南側および貯蔵船三号の南側のそれぞれ3箇所超音波式波高計を設置し、また、白島一号の南北中央に超音波



図一2 実証観測用係留装置模式図

式流向流速計を設置してデータを取得した。

貯蔵船動揺のうち、前後移動はNo. 1および3ドルフィン上に、左右移動はNo. 3および4ドルフィン上に設置した変位計で、また上下揺れ、横および縦揺れは貯蔵船上に設置したサーボ式加速度計とサーボ式傾斜計により、それぞれデータを取得した。

副防舷材の変形は副防舷材に設置した変位計で、反力は副防舷材の取り付け基部に設置したロードセルでそれぞれデータを取得した。

2.5 観測データ収録法

データ収録は、定時観測と連続観測の2方法の自動観測モードで行った。定時観測は、自然条件の強弱に係わらず定時間の観測データの収録を目的に風向、風速、波高、潮位を毎偶数時前後15分（計30分間）、貯蔵船動揺量、副防舷材の変形量・反力を毎正午前後の15分（計30分間）および気温、水温、気圧を毎正午に計測した。

連続観測はシミュレーション計算に用いる観測データの収集が目的であり、海上風（10 m高さ）の平均風速が11 m/s以上になった時、または副防舷材の変形量が75 mm（15%）以上になった時から自動的に全項目の計測を開始し、双方の観測値が計測開始設定値以下になった時から1時間経過後まで計測した。

3. 観測データおよび評価対象ケースの選定

観測期間中に取得した連続観測データは、565回であった。評価対象ケースは、波による影響は小さいため風のみに着目し、風速が大きく比較的安定している観測データをN系、S系およびE系の気象擾乱別に選別した。選別した観測データは、南側の係留設備に影響を及ぼすN系風向の観測データが37ケース、北側の係留設備に影響を及ぼすS系風向の観測データが7ケース、そして西側の係留設備に影響を及ぼすE系風向の観測データが23ケースであった。数値計算ケースの選定に際しては、環境外力と貯蔵船動揺との大略の相関を検討するとともに、風速の大きさと副防舷材の変形量の大きさも選定基準に加味して表一2に示す日付のケースに絞り込んだ。

N系の気象擾乱の①と④のケースは風向、風速とも安定しており、No. 3、No. 4副防舷材が作動している。②

表一2 評価対象ケース

ケース	N系 気象擾乱	S系 気象擾乱	E系 気象擾乱
①	H 6.9.29 5:00	H 6.10.12 4:30	H 6.8.13 16:00
②	H 6.9.29 16:30	H 6.10.12 7:00	H 6.8.13 18:00
③	H 6.9.29 22:00	—	—
④	H 7.3.28 2:00	—	—

のケースは最大風速観測ケースで、No. 3のシアーピンが切断し主防舷材が作動している。また、③のケースは最大波高観測ケースで主防舷材のみが作動している。S系の両ケースは風向、風速ともに安定しており、No. 1, No. 2副防舷材が作動している。ただし、②のケースは風速が20 m/s強と大きく、そのため副防舷材の変形が大きくなり、主防舷材にも接触している。E系の両ケースは、風向、風速ともに安定し、風速は最大に近いものである。

4. 観測結果と数値シミュレーション結果との比較

4.1 評価手順の概要

係留施設の設計に使用した数値シミュレーション手法(設計入力対応)の妥当性を確認するために、以下に述べる評価手順(図-3)により検証することとした。

本施設の設計に用いた数値シミュレーションは概念的に分けて、外力の入力条件を推算する部分と貯蔵船の動揺および防舷材変形を再現する部分からなっている。検証の第一段階(観測入力対応)は、貯蔵船に働く外力を計算するための入力条件として実際の観測データを貯蔵船動揺計算プログラムに入力し、それにより再現された貯蔵船の動揺および防舷材変形とその時の観測データを比較し、貯蔵船の動揺や防舷材変形を再現する部分の信頼性の検証を行うものである。

第二段階(設計入力対応)は、沖波と海上風の観測値から設計時に採用した手法で外力の入力条件を推算し、それを第一段階で検証された貯蔵船動揺計算プログラムに入力して貯蔵船の動揺および防舷材変形を再現し、観測データと比較して設計時に採用した外力推算手法が適

切であるか、また数値シミュレーション全体が係留施設にとって安全側であるかどうかを確認するものである。

a) 観測入力対応

本方法の外力入力条件は、波については泊地内の貯蔵船近傍で観測した波高、波向およびパワースペクトル分布形を、風については泊地外海上の観測櫓上10 mの風速データ、風向および高さ方向の風速分布は同観測櫓上および貯蔵船上の観測データである。また、パワースペクトル分布形は同観測櫓上10 mのデータから設定する。

ここでは、貯蔵船の主要モードについての計算値と観測値と比較し、両者の整合性を確認する。その整合性判定の基準は、防舷材の変形、反力の計算値と観測値の有義値の比較で $\pm 20\%$ 以内にあることとした。

b) 設計入力対応

本方法の外力(推算)の入力条件は泊地内波として、泊地外の北方海上の沖波の観測データと巻幡ら(1995)により大縮尺水理模型実験で得られた波高の多重反射係数および波周期の変換係数を使い推算する。また、パワースペクトル分布形は光易II型を採用する。風については、風速および風向は海上の観測櫓上10 mで得られたデータを、風の高さ方向分布は1/7乗則とする。また、パワースペクトル分布形はダベンポート型を採用する。

ここでは、設計時に採用した数値シミュレーションが安全側に設定されていることを確認する必要がある。判定の基準として防舷材の変形、反力の計算値が観測値との比較(有義値)で、下回らないこととした。

4.2 数値計算法

貯蔵船の動揺変位を η_i とすると、6自由度の浮体の運動方程式は一般に次の形で表される。

$$(M_{ij} + A_{ij}) \frac{d^2 \eta_i}{dt^2} + B_{ij} \frac{d \eta_i}{dt} + C_{ij} \eta_i = D_i(t) + F_i(t) \quad (1)$$

ここで、 M_{ij} : 貯蔵船の質量および慣性モーメント、 A_{ij} : 付加質量および付加慣性モーメント、 B_{ij} : 造波減衰係数、 C_{ij} : 復原力係数、 $D_i(t)$: 係留力、 $F_i(t)$: 強制外力、

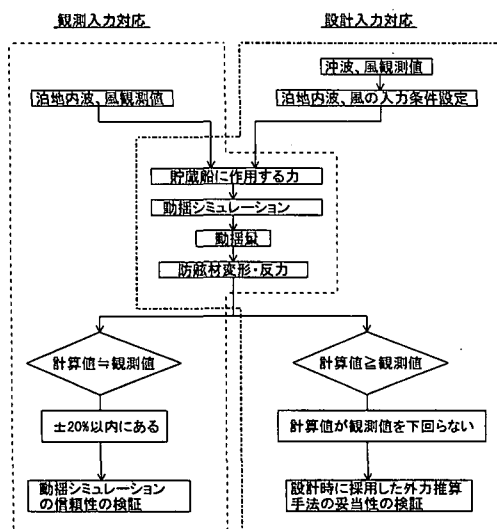


図-3 評価手順の概要

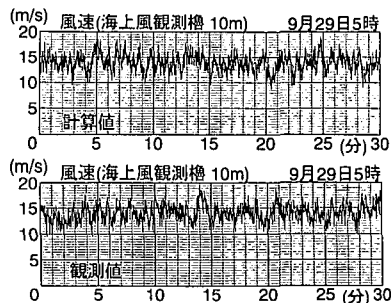


図-4 風入力の時系列による比較

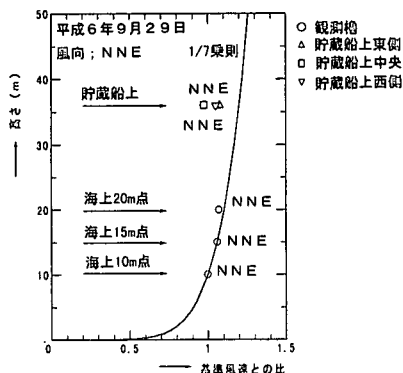


図-5 風速の高度方向分布の観測結果

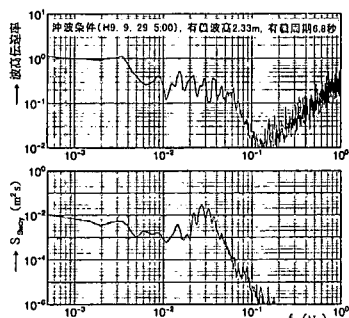


図-6 泊地内波の波高伝達率の観測結果

である。

運動計算は、①外力は時間とともに変化する不規則変動量、②運動はすべて小変位、③流体力係数や風抗力係数は一定値、という条件のもとに、ルング・クッタ・ギル法で時系列を求めるという方法を用いる。

4.3 数値シミュレーションの入力条件の設定

数値シミュレーションを行うには、気象・海象、貯蔵船主要目および防舷材の特性などの諸条件を実証観測データ等により設定しなければならない。

風に関する入力方法は、4.1 に述べたとおりであるが、一例として観測入力対応について観測値と計算値を比較すると図-4 のようである。入力したスペクトル分布形から発生させた時系列（計算値）は観測データとよく一致している。また、風の高度方向分布形状は、貯蔵船の周囲に基地の施設がある場合は1/7乗則が合いにくい傾向にある（図-5）ことから、本観測入力対応計算では一様分布とする。風圧力係数は、風洞実験より求めた風荷重の実測値を用いて求める。

波に関する入力方法は、4.1 に述べたとおりであるが、泊地内波は図-6 のような波高伝達率を示し、低周波域は北防波堤を介しての伝達波、高周波域は風波による泊地内波と考えられ、設計入力対応ではこれらを考慮して入力する。参考に、左右揺れのスペクトルを併せて示す。波強制力の計算は、波スペクトルに基づいて伝達関数を

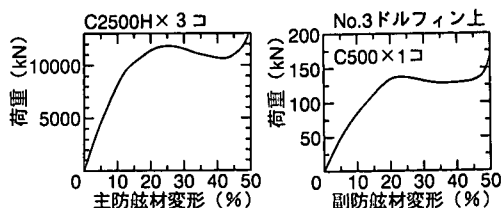


図-7 主・副防舷材の特性

表-3 N系ケース①の外力条件

入力対応	波高	波周期	波向	風速	風向
観測入力	5.0 cm	4.3 秒	-140.5°	13.6 m/s	88.0°
設計入力	5.0 cm	9.8 秒	107.0°	13.6 m/s	88.0°

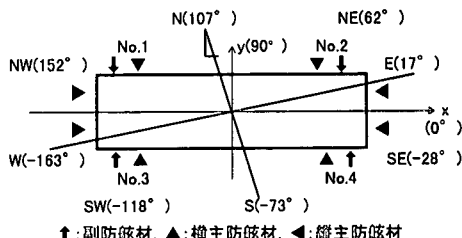


図-8 貯蔵船座標と角度の定義

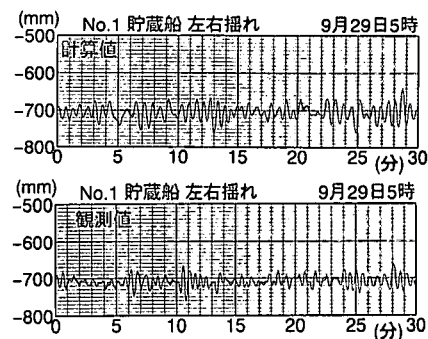


図-9 貯蔵船動揺に関する計算値と実測値の比較

考慮して波強制力の時系列を算出する。

主・副防舷材の特性は、図-7 に示す製造所（株）ブリヂストンの試験結果を用いた。

運動方程式（1）を解く際、流体力係数（ A_u, B_u ）が必要であるが、流体力係数は動揺周期によって値が異なるので、収束計算によって設定する。

4.4 数値シミュレーション計算結果

実証観測期間中における気象擾乱毎の貯蔵船動揺形態を防舷材に対する接触状態から分類すると、①副防舷材に接触して動揺、②主・副防舷材に接触して動揺、③主防舷材に接触して動揺する場合の3形態が発生している。

①の動揺形態は、副防舷材が健全に作動しており実証

表-4 観測入力対応の副防舷材変形・反力の統計量

項 目	統計量	計算値 (a)	観測値 (b)	$\frac{(a)-(b)}{(b)}$
No. 3 副防舷材 変形量	平均値	45.0 mm	49.0 mm	
	有義値	84.0	78.9	0.065
No. 4 副防舷材 変形量	平均値	46.0	49.5	
	有義値	85.0	79.5	0.069
No. 3 副防舷材 反力	平均値	60.8 kN	63.1 kN	
	有義値	114.0	118.8	-0.040
No. 4 副防舷材 反力	平均値	62.5	60.6	
	有義値	114.5	111.8	0.025

表-5 設計入力対応の副防舷材変形・反力の統計量

項 目	統計量	計算値 (a)	観測値 (b)	$\frac{(a)-(b)}{(b)}$
No. 3 副防舷材 変形量	平均値	65.0 mm	49.0 mm	
	有義値	120.0	78.9	0.521
No. 4 副防舷材 変形量	平均値	69.0	49.5	
	有義値	132.0	79.5	0.660
No. 3 副防舷材 反力	平均値	83.1 kN	63.1 kN	
	有義値	141.0	118.8	0.187
No. 4 副防舷材 反力	平均値	84.9	60.6	
	有義値	142.1	111.8	0.271

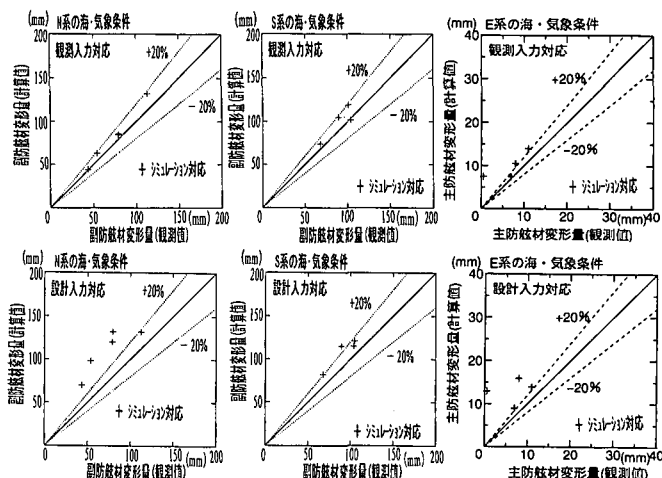


図-10 シミュレーション計算と観測値の相関

観測の主たる目的に合致し、計算手法の整合性を評価するのに有効なケースである。したがって、ここでは①の貯蔵船の動揺形態について、N系ケース①(表-2)を中心に計算手法の整合性の評価を行った結果を示す。本ケースの計算条件は、表-3に示すとおりである。なお、貯蔵船の座標と角度の定義を図-8に示す。

本ケースは、貯蔵船が副防舷材(No.3, No.4 ドルフィン側)に接触して左右揺れする場合である。表-4は、観測入力対応の数値シミュレーション結果を示したものである。副防舷材変形および反力の有義値の計算値と観測値との比は±20%以内に入っている。図-9は左右揺れの計算値と観測値を比較したものである。

表-5は、設計入力対応の計算結果である。副防舷材変形および反力の有義値の計算値は、観測値を下回らない結果となった。

4.5 結果の評価

各気象擾乱別の主・副防舷材変形の有義値について、図-10に観測値と計算値の相関を示しているが、①観測入力対応では計算値と観測値との比は±20%である、②設計入力対応では計算値が観測値を下回らないことが確認できた。貯蔵船動揺に影響を与える主要な環境外力に

対する数値シミュレーション計算結果は、観測された現象を十分に説明でき、数値的な精度も十分に検証された。

5. 結 言

本実証観測では、通常海・気象条件でも精度よく貯蔵船の動揺量や防舷材の変形量が観測できるように新たに副防舷材を設置して動揺拡大措置が講じられた。

今回の実証観測から、浮体構造物の設計に有用な各種観測データが得られた。また、係留設計に用いた数値シミュレーション手法は、精度上および信頼性とも十分満足できるものであることが、取得したデータに基づく評価により判明した。最後に、本実証観測結果は評価検討委員会(堀口孝男委員長、東京都立大学名誉教授)のもとに検討されたことを付記するとともに、実証観測を実施するに当たり協力された関係各位に謝意を表す。

参 考 文 献

- (社)日本港湾協会(1989): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp. 132-134.
- 巻幡敏秋, 与口正敏, 永田修一, 三宅成司郎, 遠藤秀一, 藤田孝, 加藤英二(1995): 泊地内に係留された複数貯蔵船の運動特性, 日立造船技報, 第55巻, 第4号, pp. 35-42.